

등가등분포 적재하중의 확률론적 분석

Probabilistic Analysis of Equivalent Uniformly Distributed Live Loads

○ 김 상 효* 정 시 현** 조 형 근***
Kim, Sang Hyo Chung, Si Hyun Cho, Hyung Keun

ABSTRACT

Since 1960's, structural engineers have recognized that the inherent random nature of loadings and materials as well as the imperfect structural analysis may be important factors in the structural safety evaluation. Based on the successful developments of the reliability-based structural analysis and design, the design criteria of the standards are recently developed(or modified) in the light of the probabilistic concepts.

To develop the probability-based design criteria for the domestic buildings, the probabilistic characters of loadings acting on structures should be defined first.

In this study, therefore, live load data on apartment buildings have collected and analyzed in a systematic manner, and their probabilistic characteristics have been studied. Based on the results, the lifetime extreme values are computed and compared with current design loads. More rational design loads are suggested, which are more consistent in the probabilistic concepts.

1. 서론

1960년대 이후 구조공학에서 확률이론의 활발한 도입 및 연구가 이루어짐에 따라 특정한 한계상태에 도달하지 않는 확률을 보장하는 한계상태 설계법이 급속히 도입되고 있다. 국내에서 이러한 확률론적 설계법을 도입하기 위해서는 설계시 고려되어야 하는 하중들을 체계적으로 조사하여 작용하중들의 확률적 특성을 규명하는 연구가 선행되어야 한다. 이러한 연구결과를 바탕으로 현행 설계하중의 검정이 실시되고, 나아가 합리적이고 현실적인 설계하중 및 여러 작용하중간의 하중조합에 관한 규준설정이 이루어져야 할 것이다.

인구의 증가와 급격한 경제성장에 따라 최근에 그 수요가 급속히 증가하고 있는 아파트는 많은 인구가 집단적으로 거주하는 공동주택으로 그 안전도 및 경제성이 다른 건축구조물에 비교할 때 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 기존 아파트 거주가구를 대상으로 체계적으로 수집한 자료를 이용하여 적재하중의 확률적 특성을 분석하고, 구조물의 예상사용기간에 대한 극한값을 검토하였다.

2. 적재하중의 분석과 조사 방법

2.1 적재하중의 분석

일반 구조물에 작용하는 하중들은 크게 인위적인 하중과 자연현상에 의한 하중으로 구분될 수 있다. 인위적인 하중이란 인간의 활동에 의해서나 또는 그 활동을 위한 시설물들에 의해 발생하는 하중을 말하며, 자연현상에 의한 하중은 기상학적 또는 지질학적 변화에 의해 발생하는 하중을 말한다. 인위적인 하중들 중에서 중력(Gravity)에 의해 발생하는 주요 하중은 고정하중, 적재하중 등이다. 사하중(Dead load)이라고도 불리는 고정하중은 주요 구조부재의 자중과 이에 부착, 고정되어 있는 벽체 및 각종 시설물이나 설비등의 자중으로 인한 중력방향의 하중이다. 활하중(Live load)이라고도 불리는 적재하중은 구조물의 사용에 따라 수용 및 적재되어지는 사용자와 물품등의 중량으로서 하중의 이동, 편재, 집중등이 항상 예상되어지는 중력방향의 하중이다. 이때의 물품들이란 구조물 특히 실의 사용자가 그들의 사용목적에 의해 반입, 설치하는 것들로서 항상 이동 배치가 가능하며, 또한 실의 사용자가 바뀌어 짐에 따라, 즉 시간의 경과에 따라 하중의 크기도 변화하여 일반적으로 구조물의 설계시에 정확히 그 크기나 변화 빈도등을 예측하기가 어렵다는 특성을 가지고 있다. 이러한 불확실성 요인들을 이를 합리적으로 반영하기 위해서 일반적으로 확률변수(Random variable) 보다는 확률과정(Stochastic process)을 이용하여 하중을 모형화(Modeling)한다. 포아슨 막대 확률과정(Poisson rectangular pulse pro-

* 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구실, 수석연구원, 공학박사

** 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구실, 선임연구원, 건축구조기술사

*** 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구실, 선임연구원

cess)은 여러가지 확률과정 모델들 가운데에서 정적하중(Stastic loads)의 모형화 를 위해 가장 널리 사용되는 확률과정이다.

적재하중은 하중자료의 분석방법에 따라 단순등분포하중 (Uniformly Distributed Load or Unit Area Load)과 등가등분포하중(Equivalent Uniformly Distributed Load)으로 분류된다. 전자는 단순하게 대상영역에서 재하되어 있는 물품하중의 크기만을 나타내지만 평형별, 사용용도별의 특성을 잘 반영하여 준다. 반면에 후자는 구조체내에서 실제 재하상태에 의해 발생하는 최대응력과 동등한 하중효과(Load effect)를 재현하는 등분포하중이다. 따라서 구조체의 역학적 특성과 적재하중의 평면적 분포특성(집중 및 편중)을 반영, 실제설계에서 고려되는 적재하중이다.

2.2 적재하중의 조사 방법

적재하중의 확률적 특성을 분석하기 위한 가장 기본적인 중요한 단계가 적재하중의 측정이다. 하중측정을 위해서는 우선 모집단이 되는 전국 아파트의 분포특성을 잘 반영할 수 있는 대상집단을 선정하여야 하는데, 본 조사에서는 계층별 무작위 추출(Stratified Sampling) 방법을 이용하여, 평형별, 지역별, 층수별등을 기준으로 조사대상을 선정하였다. 대상가구는 서울과 부산지역에서 최소 13평형(분양평수)에서 부터 최대 56평형까지 총 233세대가 선정되었다.

정확한 하중자료의 수집을 위해서는 조사현장에서 직접 중량을 측정하는 직접조사 방법을 이용하여 하지만, 이의 비현실성 때문에 간접조사 방법을 이용하였다. 간접조사 방법이란 조사현장에서는 대상가구의 평면도에 적재물품의 위치 및 재원을 도시하고, 추후 내업을 통해 조사된 재원으로 부터 간접적으로 하중을 환산하는 방법이다. 보다 자세한 것은 참고문헌1에 정리되어 있다.

3. 등가등분포하중의 분석기법

3.1 하중자료 분석

각 조사대상가구의 평면도에 기록, 수집되어진 적재물품의 자료를 전산기에 입력할 수 있는 자료로 정리한 후, PC용 dBASE III를 이용하여 개발된 자료입력 및 간접하중 환산용 프로그램을 이용하여 각 품목의 중량을 산정하고, 품목위치를 계산한다. 개발된 프로그램은 품목중량 계산과 세대평면내의 좌표계산으로 구성되며, 세대별 평면에 관한 자료와 각실의 절점 번호, 절점의 좌표, 품목의 가로, 세로, 높이, 특성, 실내에서의 좌표(Local 좌표)등의 입력자료를 이용하여 품목중량과 품목의 세대평면내 좌표 즉 global 좌표를 발생시키도록 하였다.

3.2 등가등분포하중 산정

등가등분포하중은 실제 재하상태와 같은 하중효과를 재현하는 등분포하중이므로, 재하되어 있는 구조물의 특성과 상대적인 재하위치에 따라 그 크기가 달라진다. 일반적인 구조물에서는 대상이 되는 하중효과에 대한 영향선(Influence line or surface)을 이용하여 등가등분포하중을 간편하게 구할 수 있다. 그러나 아파트의 경우 평면형태(구조형태)와 최대응력 발생지점이 불규칙적이어서 영향선의 이용이 불가능하였다. 따라서 각종 재하상태에 대하여 구조물은 그대로 구조해석하여 실

제 하중재하시의 응력값과 등분포하중을 재하시켰을 때의 응력값을 구한 후 이로부터 등가등분포하중값을 구하였다. 이를 위해 본 연구에서는 VAX 8600 컴퓨터에 설치되어 있는 범용구조해석 프로그램인 GSTRUDL을 이용하였다.

등가등분포하중 산정에서는 먼저 전체 조사아파트를 내력벽식 구조(Wall-column 형식)와 모멘트골조식 구조(Beam-column)로 구분하여, 각 부재별로 다른 하중효과를 고려하였다. 즉 슬래브에서는 장·단변방향의 정모멘트(Positive moment)와 부모멘트(Negative moment)이며, 보에서는 정모멘트와 부모멘트이다. 기둥에서는 축력과 모멘트의 조합효과에 대해 등가등분포하중을 산정하였다. 그러나 내력벽에서는 축력만을 고려하였다.

전체구조체는 거동 특성과 설계실무를 고려하여 여러개의 영역으로 분할하였으며, 각 세대별 등가등분포하중은 각 영역에 대해 위에서 고려한 하중 효과들에 의한 등가등분포하중들 중에서 최대값으로 결정되었다. 이는 아파트의 구조형식이 영향면적을 정확하게 구획하기가 어려우며, 현행 시방서가 영향면적에 따라 설계하중을 달리 하는 것이 아니라, 단순히 부재에 따라 다른 설계하중을 선택하고 있는 것을 고려한 것이다. 단 내력벽식 구조의 슬래브에 있어서 최대값이 부근(장변)방향의 모멘트에 의해 결정될 때는 실제하중에 대한 모멘트 값을 검토하여, 그 크기가 기본배근에 의해 처리될 수 있는 정도의 작은 값일 경우면, 주근(단변)방향의 모멘트에 의해 결정된 값을 그 영역의 등가등분포하중으로 선정했다.

4. 결과분석 및 극한값 분석

4.1 등가등분포하중

본 연구에서는 대상이 되는 두가지 구조형식이 매우 특이하므로 등가등분포하중 산정결과를 각 구조형식별로 정리하였다(표1, 표2).

내력벽식 구조에 있어서 슬래브에 대한 등가등분포하중이 내력벽에 대한 것 보다 평균값(103Kg/m² 과 87Kg/m²)과 변이계수(0.43과 0.39) 모두에 있어 크게 나왔다.

전용면적에 따른 하중의 변화는 변이계수에는 약간 일관성이 결여되어 있으나, 평균하중은 전용면적의 증가에 따라 감소하고 있는 것으로 나타났으며, 내력벽의 경우가 슬래브보다 다소 확실한 감소경향을 나타내고 있다. 슬래브에 대한 등가등분포하중의 평균과 변이계수가 내력벽의 결과보다 크고, 전용면적이 증가함에 따라 평균과 변이계수가 감소하는 현상들은 모두 영향면적(Influence area)의 차이에 따른 것이다.

모멘트 골조의 슬래브와 기둥에 있어서의 결과(표2)를 내력벽식의 슬래브와 내력벽의 결과와 비교할 때 평균값은 매우 비슷한 수준(98과 103Kg/m², 85와 87Kg/m², 이하 단위생략)이나, 변이계수(c.o.v.)는 상당한 차이가 있다(0.29와 0.43, 0.21과 0.32).

모멘트 골조에 있어서도 슬래브에서는 전용면적에 대해 별다른 변화경향이 없다. 그러나 보에 있어서는 전용면적의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며, 기둥에 있어서는 보다 확실한 경향을 보이고 있다. 부재별 등가등분포하중을 비교하면 슬래브와 보에 대해서는 평균값은 비슷하나(98.0과 97.5), 변이계수에서는 차이를 보이고 있다(0.29와 0.21). 기둥은 여타 부재에 대해 평균

〈표1〉 내력벽식 구조의 등가등분포하중
단위 : Kg/m²

전용면적(m ²)		A ≤ 45	A ≤ 65	A > 65	전 체
슬래브	평 균	107.3	106.6	95.5	103.1
	c.o.v.	0.40	0.47	0.37	0.43
	Max.	193.1	291.1	202.8	291.1
	Min.	47.8	41.3	41.2	41.2
내력벽	평 균	112.2	85.2	73.5	87.1
	c.o.v.	0.34	0.21	0.27	0.39
	Max.	189.0	144.8	123.4	189.0
	Min.	45.3	57.0	46.6	45.3
세 대 수		28	60	43	131

〈표2〉 모멘트 골조의 등가등분포하중
단위 : Kg/m²

전용면적(m ²)		A ≤ 45	A ≤ 65	A > 65	전 체
슬래브	평 균	97.4	100.9	95.4	98.0
	c.o.v.	0.29	0.33	0.26	0.29
	Max.	172.8	167.4	151.2	72.8
	Min.	63.9	54.0	57.8	54.0
보	평 균	107.1	96.9	88.2	97.5
	c.o.v.	0.19	0.15	0.23	0.21
	Max.	149.6	137.9	142.3	149.6
	Min.	63.4	73.0	59.7	59.7
기 둥	평 균	92.7	89.1	72.3	84.8
	c.o.v.	0.20	0.16	0.21	0.21
	Max.	131.6	134.4	101.8	134.4
	Min.	58.1	59.5	52.9	52.9
세 대 수		34	35	33	102

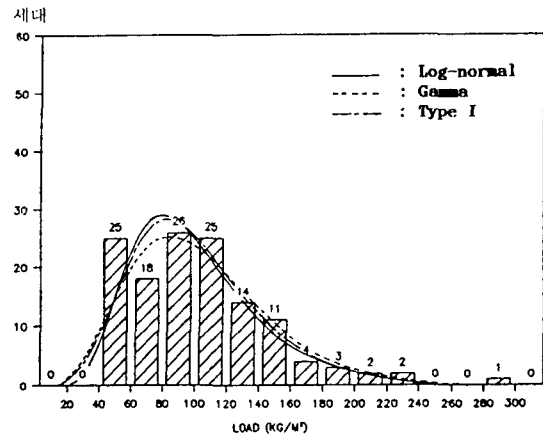
값이 작으며(84.8), 변이계수는 보(0.21)와 같은 수준이다. 이러한 결과는 모멘트 골조의 전형적인 구조형태를 부재별 영향면적의 측면에서 분석할 때 타당한 결과라고 할 수 있다.

4.2 최적확률분포의 선정

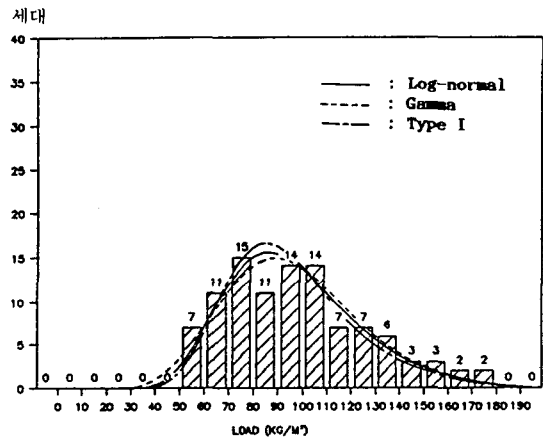
등가등분포하중 분포의 확률분포와의 적합도를 검토하기 위하여 정규분포(Normal distribution), 대수정규분포(Lognormal distribution), 감마분포(Gamma distribution), 그리고 Gumbel의 Type-I에 대해 χ^2 -test와 K-S test를 실시하였다(참고문헌 1).

결과에 의하면 정규분포를 제외한 나머지 대상 확률분포에서는 하중분류에 따라 차이가 있어 하나의 최적확률분포의 선정이 어려웠다. 전반적으로 볼 때 Gamma 분포가 무난하며, Lognormal 분포도 적합성이 좋은 것으로 나타났다. Type-I 분포도 수치상으로는 하자가 없었다. 그러나 Type-I 분포에 있어서는 '0' 보다 작은 값이 존재할 수 있다는 특성과 상단미(Upper tail)에서 너무 급속

히 감소한다는 점이 문제점이다. 다른 적재하중분석 자료에서도 주로 Gamma 분포가 제일 적합한 것으로 보고되었다(Corotis, Kanda). 따라서 본 연구에서는 Gamma 분포와 그와 비슷한 특성을 가진 Lognormal 분포에 대해 중점적으로 검토하였다. 확률분포의 선정은 일반적인 하중범위(평균값 근처)에서는 별다른 문제가 없으나, 극한값(특히 상단부분)에서는 선정된 확률분포가 매우 민감한 역할을 한다. 〈그림1〉에서는 부재별 실제분포(histogram)와 선정대상이 되는 확률분포가 함께 도시되어, 그들의 적합성을 잘 보여주고 있다.



(a) 내력벽식 구조의 슬래브에 대한 EUDL



(b) 모멘트 골조의 슬래브에 대한 EUDL

〈그림1〉 부재별 EUDL 분포도

4.3 사용기간 최대하중 분석

지금까지 분석한 자료는 구조물의 사용기간중에 발생하는 임의의 시점에서의 작용하중의 확률적 특성에 관한 것이다. 구조물 사용자 측면에서 보면 임의의 시점에서의 적재하중의 크기가 중요하다. 그러나 설계자나 시방서 제정의 관점에서 보면 구조물의 예정된 사용기간동안 발생할 수 있는 최대하중효과가 가장 중요하다.

적재하중은 앞에서 언급한 바와 같이 포아손 확률과정을 이용하여 모형화 하는 것이 가장 합리적이다. 따라서 사용기간 최대값(표3)은 아래의 식을 이용하여 구할 수 있다 :

$$F_{S_{max}}(X) = \exp \{-\lambda_s T[1-F_S(X)]\} \quad (1)$$

여기에서 $F_S(X)$ 는 등가등분포하중의 누적확률합수(Probability distribution function)이며, λ_s 는 등가등분포하중의 평균발생빈도, T는 구조물의 예상 사용기간이다.

<표3>은 각 부재별 사용기간 최대값을 50년의 사용기간과 5년의 평균 거주기간을 가정하고, Gamma 분포와 Log-normal 분포에 대하여 분석한 결과이다. 확률분포의 특성에서 예측할 수 있듯이 Log-normal 분포가 약간 큰 극한값을 보이고 있다. 일반적으로 건축구조물의 적재하중은 인위적으로 제한되어질 수 있는 특성을 가지고 있으므로 Log-normal 분포 보다는 Gamma 분포가 합리적인 것 같다.

<표3> 적재하중 사용기간 최대값

단위 : Kg/m²

	평균	c.o.v.	Gamma			Lognormal			
			90%	95%	99%	90%	95%	99%	
내력벽식	슬래브	103.1	0.43	231.6	251.6	294.9	244.9	272.7	338.0
	내력벽	87.1	0.39	163.9	175.0	198.9	170.5	184.9	217.6
모멘트골조	슬래브	98.0	0.29	175.1	186.2	210.0	181.3	195.2	226.4
	보	97.5	0.21	150.8	158.0	173.1	154.1	162.6	181.3
	기둥	84.8	0.21	131.2	137.4	150.6	134.0	141.5	157.6

(주) 평균발생빈도=0.2/yr, 구조물 사용기간=50년

<표3>의 극한값 분석결과를 실측 조사자료(표1, 표2)와 비교하면 내력벽식 구조에서는 131세대 조사결과와 최대값이 Gamma-99% 극한값과 비슷한 수준이나, 모멘트 골조(102세대)에서는 Gamma-90% 극한값의 수준이다. 현행 시방서에 제시되어 있는 설계하중(슬래브-180Kg/m², 보, 기둥-130Kg/m²)은 모멘트 골조 구조의 슬래브와 기둥에 있어 Gamma-95%의 수준이며, 모멘트 골조의 보와 내력벽식 구조에 있어서는 매우 낮은 수준이다. 외국의 조사결과에 의하면, 건축물의 설계하중은 참고등을 제외하면 대략적으로 Gamma-99%(50년 사용기간) 또는 이상의 수준이다(Peir, Corotis).

최근 국내아파트의 재개발 시한이 20년 정도로 제한되어 있는 것을 고려하여, 예상 사용기간에 대한 최대값의 민감도를 비교한 결과가 <표4>에 30년과 50년에 대하여 정리되어 있다. 95% 최대값에 대하여 약 5% 정도의 차이를 보이고 있다.

5. 결론

본 연구의 분석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 현행 설계하중은 비교적 낮은 수준이며, 특히 내력벽식 구조에서는 매우 낮다.

<표4> 최대값의 사용기간 민감도 분석 (Gamma 분포)
단위 : Kg/m²

부재	사용기간	90%		95%		99%	
		30년	50년	30년	50년	30년	50년
내력벽식	슬래브	217	232	237	252	282	295
	내력벽	156	164	167	175	192	199
모멘트골조	슬래브	167	175	178	186	202	210
	보	145	151	153	158	169	173
	기둥	127	131	133	137	147	151

(주) 평균발생빈도=0.2/yr

2) 아파트 적재하중의 확률적 모형은 Gamma 분포가 타당한 것으로 판단된다.

3) 등가등분포하중은 영향면적과 밀접한 관계를 보이고 있다. 따라서 현행 시방서가 영향면적에 따른 설계 적재하중의 변화를 단순히 구조부재별 분류로 나타내고 있는 것은 합리적이지 않다. 현행 방식을 유지하더라도 내력벽식과 모멘트 골조식, 보와 기둥은 분리되어야 한다.

4) 모멘트 골조식 구조의 슬래브와 기둥에 대하여 현행 설계하중을 유지한다면, 다음과 같은 부재별 설계하중이 적절한 수준으로 판단된다.

단위 : Kg/m²

부재	현행	제안	
내력벽식	슬래브	180	230
	내력벽	130	160
모멘트골조	슬래브	180	180
	보	130	150
	기둥	130	130

참고 문헌

1. 한국건설기술연구원, "아파트의 적재하중에 관한 통계적 연구", 연구보고서, 건기연 88-SE-1, 1988.12.
2. McGuire R.K., and Cornell C.A., "Live Load Effects in Office Buildings", Research Report R73-28, MIT, Dept. of Civil Eng., Cambridge, Mass., May 1973.
3. Peir J-C., and Cornell C.A., "Spatial and Temporal Variability of Live Loads", ASCE, Vol. 99, No. ST5, May 1973, pp903-922.
4. Corotis R.B., and Doshi V.A., "Probability Models for Live-Load Survey Results", ASCE, Vol. 103, No. ST6, June, 1977, pp1257-1274.
5. Kanda J., and Kinoshita K., "A Probabilistic Model for Live Load Extremes in Office Buildings", 4th Int. Conf. on Structural